

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПО СПИРАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ АРХИМЕДА МЕХАТРОННЫМ ПРОФИЛОГРАФОМ

*Федорова А.А., Жижко А.А., Иванов К.Г.*

*Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары*

**Ключевые слова:** мехатронный профилограф, спиральная траектория, лазерный датчик, частота вращения привода, спираль Архимеда, показатели качества почвы.

**Аннотация.** С развитием промышленности растут требования к измерительным средствам шероховатости поверхности не только по точности, но и по скорости. Предметом исследования является процесс измерения показателей качества для целесообразности машин и орудий для обработки почвы. Для измерения шероховатости профиля поверхности почвы предлагается использовать лазерный профилограф для спирального сканирования. Цель работы – определение зависимости изменения частот вращения двигателей по времени для оптимизации измерения лазерным датчиком по спирали Архимеда мехатронным профилографом для повышения эффективности исследования почвы. В статье приводятся вычисления зависимости частот вращения приводов профилографа от времени для обеспечения равномерности измерения. Получены графики зависимости частот вращения приводов опытного образца профилографа с определенными конструктивными параметрами для предпосевной и зяблевой обработки. Анализ представленных графиков показывает, что можно обеспечить оптимальное измерение с сохранением постоянного шага по траектории движения лазерного датчика в виде спирали Архимеда при изменении частот вращения профилографа.

## OPTIMIZATION OF MEASUREMENT ALONG THE ARCHIMEDES SPIRAL TRAJECTORY USING A MECHATRONIC PROFILOGRAPH

*Fedorova A.A., Zhizhko A.A., Ivanov K.G.*

*Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary*

**Keywords:** mechatronic profiler, spiral trajectory, laser sensor, drive rotation speed, Archimedes spiral, soil quality indicators.

**Abstract.** With the development of industry, the requirements for surface roughness measuring instruments are increasing, not only in terms of accuracy, but also in terms of speed. The subject of the study is the process of measuring quality indicators for the feasibility of machines and tools for soil cultivation. To measure the roughness of the soil surface profile, it is proposed to use a laser profiler for spiral scanning. The purpose of the work is to determine the dependence of changes in engine rotation speeds over time for optimization of measurement with a laser sensor along the Archimedes spiral with a mechatronic profiler to increase the efficiency of soil research. The article provides calculations of the dependence of the rotating speed of the profilograph drives on time to ensure uniformity of measurement. Graphs of the dependence of the rotation speeds of the drives of a prototype profilograph with certain design parameters for pre-sowing and autumn processing were obtained. Analysis of the presented graphs shows that it is possible to ensure optimal measurement while maintaining a constant step along the trajectory of the laser sensor in the form of an Archimedes spiral when changing the rotation speeds of the profilograph.

### Введение

При выполнении технологического процесса при испытании машин и орудий для поверхностной и глубокой обработки почвы (культиваторов, мотыг ротационных, фрезерных машин и др.) определяют несколько показателей качества, оценивая целесообразность машин и орудий для обработки почвы. Для каждого показателя качества согласно государственным стандартам должно проводиться определенное количество измерений на определенном участке [1-3]. С быстрыми темпами развития промышленности растут требования к измерительным средствам не только по точности, но и по скорости [4, 5].

Для оптимизации равномерности измерения показателей качества почвы может использоваться мехатронный профилограф [6, 7] (рис. 1), позволяющий в автоматизированном режиме измерять показатели почвы по спиральной траектории, в том числе по спирали Архимеда.

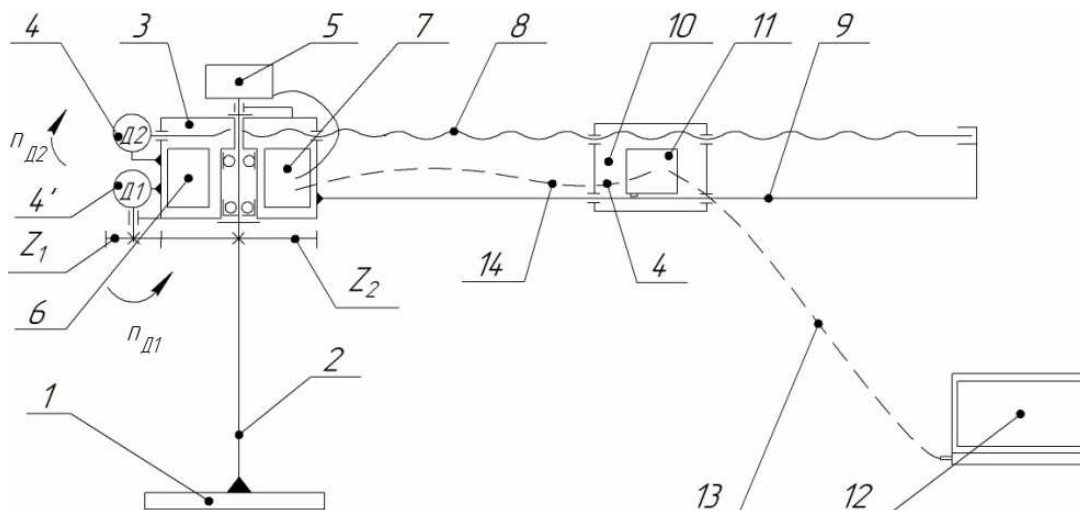


Рис. 1. Схема мехатронного профилографа: 1 – основание; 2 – стойка; 3 – корпус; 4,4' – приводы; 5 – угловой датчик; 6, 7 – блоки питания и управления; 8 – винт; 9 – направляющая; 10 – каретка; 11 – лазерный датчик; 12 – ноутбук; 13, 14 – Bluetooth,  $z_1$  – спутник;  $z_2$  – опорное колесо

Мехатронный профилограф представляет собой средство измерения, включающее в себя основание 1, связанное со стойкой 2, и установленными на ней угловым датчиком 5 и корпусом 3 с блоком питания и управления 6, 7. Круговое движение лазерного датчика сканирования 11, установленного на корпусе 3, обеспечивается приводом 4 (Д2) путем обкатки спутника  $z_1$  об опорное колесо  $z_2$ . Радиальное движение датчика обеспечивается за счет перемещения каретки 10 вдоль направляющей 9, закрепленной в корпусе 3, приводимого в движение ходовым винтом 8, связанного с приводом 4' (Д1). Измерения с датчиков 5, 11 и с блока управления 7 за счет Bluetooth-соединений 13, 14 передаются на ноутбук 12.

Цель работы – определение зависимости изменения частот вращения двигателей по времени для равномерного измерения лазерным датчиком по спирали Архимеда профилографом для повышения эффективности исследования почвы.

### Материалы и методы исследований

Спиральная траектория Архимеда обеспечивается мехатронным профилографом за счет синхронизации вращательного и радиального движения по которой движется датчик измерения.

На рисунке 2 показана схема измерения поверхности мехатронным профилографом.

Для равномерности измерения поверхности шаг измерения спирали  $S_{рад}$  и окружной шаг  $S_{окр}$  принимаются:

$$S = S_{рад} = S_{окр}. \quad (1)$$

Частоты вращения двигателей Д1 и Д2 будут зависеть от конструктивных параметров и шага измерения  $S$ , исходя из используемой машины или орудия, использованного для обработки почвы.

Формула спирали Архимеда при измерении мехатронным профилографом от периферии к центру принимает вид:

$$r_i = r_{max} - \frac{S \cdot \varphi_i}{2\pi}, \quad (2)$$

где  $r_i$  – линейная координата  $i$ -той точки спирали регулируемый приводом Д2, м;  $r_{max}$  – максимальный радиус измерения мехатронного профилографа, м;  $\varphi_i$  – угловая координата  $i$ -той точки спирали, регулируемый приводом Д1, рад.

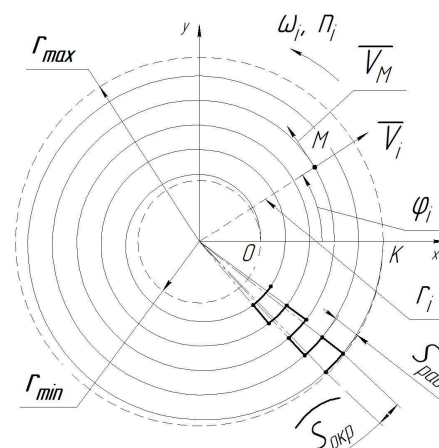


Рис. 2. Схема измерения по спирали Архимеда

Дифференцируя уравнение (2) по времени была получена зависимость линейной скорости датчика  $V_i$  от угловой  $\omega_i$ :

$$V_i = \frac{S_{рад}}{2\pi} \cdot \omega_i. \quad (3)$$

При этом линейная  $V_i$  и угловая скорость  $\omega_i$  в зависимости от обобщенных координат профилографа вычисляются по формулам [8]:

$$V_i = \frac{S_{винт}}{2\pi} \cdot \omega_{Д2}, \quad (4)$$

$$\omega_i = \left(1 + \frac{z_2}{z_1}\right) \cdot \omega_{Д1}, \quad (5)$$

где  $\omega_{Д1}$  – угловая скорость двигателя Д1, рад/с;  $\omega_{Д2}$  – угловая скорость двигателя Д2, рад/с;  $S_{винт}$  – шаг ходового винта, мм;  $z_1$  – количество зубьев сателлита 1,  $z_2$  – количество зубьев опорного колеса 2.

Частоты вращения двигателей с учетом (3)-(5):

$$n_{Д1} = n_i / \left(1 + \frac{z_2}{z_1}\right), \quad (6)$$

$$n_{Д2} = \frac{S_{рад}}{S_{винт}} n_i, \quad (7)$$

где  $n_i$  – частота вращения датчика, об/мин:

$$n_i = n_0 + \frac{30}{\pi} kt. \quad (8)$$

Для определения коэффициента  $k$  использованы частоты вращения в конечных точках спирали:

$$k = \pi(n_k - n_0) / (30t_{общ}), \quad (9)$$

где  $n_k, n_0$  – частоты вращения, соответствующие  $r_{min}, r_{max}$ , об/мин:

$$n_{K(0)} = 30S_{окр} \nu / (\pi r_{min(max)}), \quad (10)$$

$t_{общ}$  – общее время измерения, с:

$$t_{общ} = L_{спир} / V_M = \frac{S_{рад}}{4\pi} [\varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \ln(\varphi + \sqrt{1 + \varphi^2})]_{\varphi_0}^{\varphi_k} / (S_{окр} \nu). \quad (11)$$

где  $V_M$  – абсолютная скорость датчика (т.М), м/с;  $\nu$  – частота обновления данных датчика, Гц;  $L_{спир}$  – длина спирали, м;  $\varphi_k, \varphi_0$  – углы измерения, соответствующие  $r_{min}$  и  $r_{max}$ , рад:

$$\varphi_k = 2\pi r_{max} / S_{рад}, \quad (12)$$

$$\varphi_0 = 2\pi r_{min} / S_{рад}. \quad (13)$$

Окончательно с учетом (12), (13) было получено:

$$n_{Д1} = \frac{30S\nu}{\pi r_{max} \left(1 + \frac{z_2}{z_1}\right)} + \frac{120S\nu^2 \left(\frac{1}{r_{min}} - \frac{1}{r_{max}}\right)}{\left(1 + \frac{z_2}{z_1}\right) [\varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \ln(\varphi + \sqrt{1 + (\varphi)^2})]_{\varphi_0}^{\varphi_k}} t, \quad (15)$$

$$n_{Д2} = \frac{30S^2\nu}{\pi r_{max} S_{винт}} + \frac{120S^2\nu^2 \left(\frac{1}{r_{min}} - \frac{1}{r_{max}}\right)}{S_{винт} [\varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \ln(\varphi + \sqrt{1 + (\varphi)^2})]_{\varphi_0}^{\varphi_k}} t. \quad (16)$$

## Результаты

Опытный образец мехатронного профилографа для измерения по спиральной траектории Архимеда представлен на рисунке 3 и имеет конструктивные параметры, приведенные в таблице 1.

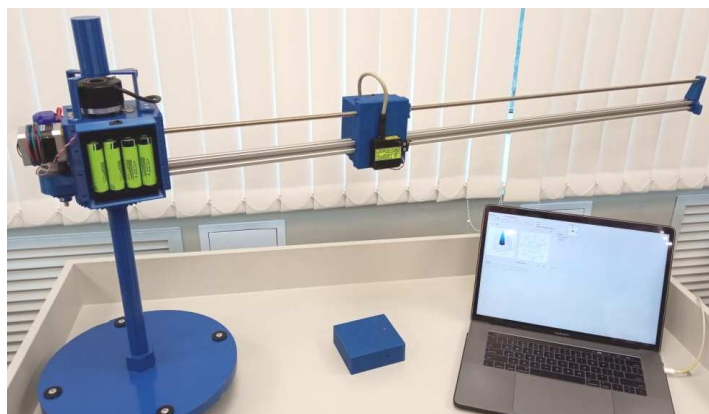


Рис. 3. Опытный образец мехатронного профилографа

Табл. 1. Конструктивные параметры мехатронного профилографа

Параметр	Значение
Количество зубьев сателлита $z_1$ , шт.	16
Количество зубьев опорного колеса $z_2$ , шт.	48
Шаг ходового винта $S_{\text{винт}}$ , мм	2
Минимальный радиус сканирования $r_{\text{min}}$ , м	0,15
Минимальный радиус сканирования $r_{\text{max}}$ , м	1,20

Шаг измерения (1) выбирается в зависимости от микрорельефа почвы, образуемой при обработке почвы. Так, для предпосевной и зяблевой обработки создается микрорельеф в пределах 1,8-3,5 мм [9].

Для реализации графика зависимости частот вращения  $n_{D1}$ ,  $n_{D2}$  от времени была использована среда моделирования SimInTech, позволяющая моделировать различные сложные вычисления [9].

Реализация приведенных формул (15) и (16) выполнена при помощи модели, представляющая собой совокупность из двух модулей: панели управления измерения и модуля управления с скриптом приведенных вычислений (рис. 4).

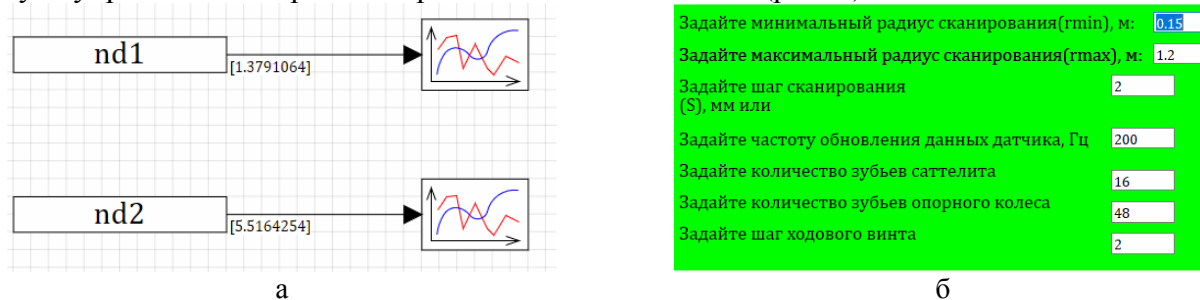


Рис.4. а) модуль управления б) панель управления для задания исходных данных

В результате при исходных конструктивных параметрах профилографа и выбранном шаге измерения  $S = 2$  мм формулы (15) и (16) приняли вид:

$$n_{D1} = 0,8 + 0,0001048t, \quad (17)$$

$$n_{D2} = 3,2 + 0,0004192t. \quad (18)$$

Получены графики зависимости частот вращения  $n_{D1}$ ,  $n_{D2}$  от времени для экспериментальной установки профилографа (рис. 5).

Судя по графику (рис. 5) можно сделать выводы, что для предпосевной и зяблевой обработки с микрорельефом в пределах 1,8-3,5 мм, значение частоты вращения  $n_{D1}$  должно пропорционально увеличиваться от 0,8 об/мин до 1,38 об/мин, а  $n_{D2}$  от 3,2 об/мин до 5,52 об/мин.

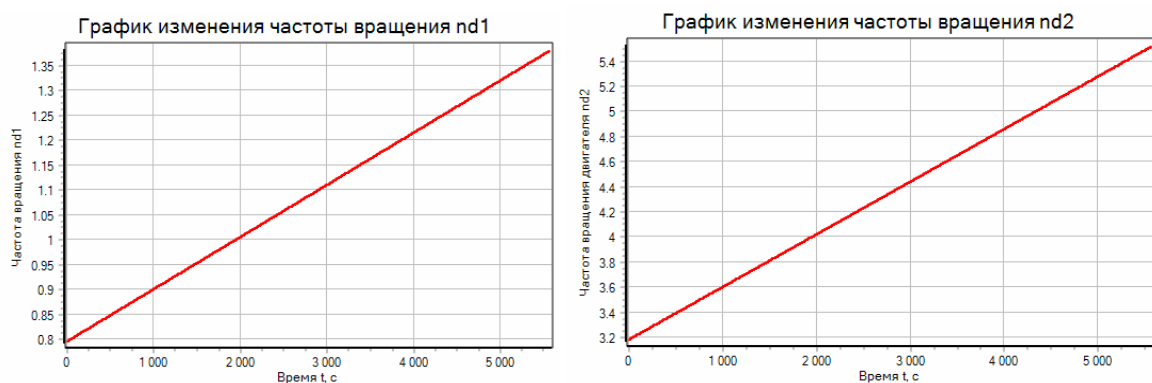


Рис. 5. Графики зависимости частот вращения  $n_{d1}$ ,  $n_{d2}$  от времени

### Заключение

В данной статье, установлено, что для определения показателей качества, используемых для оценки целесообразности машин и орудий для обработки почвы можно использовать метод спирального лазерного измерения, а также автоматизировать процесс измерения для увеличения скорости измерения. Анализ представленных графиков показывает, что можно обеспечить оптимальное измерение с сохранением постоянного шага по траектории движения лазерного датчика в виде спирали Архимеда при изменении частот вращения приводов профилографа при движении датчика от периферии к центру вращения в зависимости от времени. Результаты исследования профилографа подтверждают возможность использования профилографа для повышения эффективности исследования поверхности почвы после ее обработки.

### Список литературы

1. ГОСТ 33736-2016. Машины для глубокой обработки почвы. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2020. – 35 с.
2. ГОСТ 33687-2015. Машины для поверхностной обработки почвы. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2016. – 41 с.
3. Студеникин А.В., Мяло В.В. Методика испытаний вибрационного культиватора // Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК. Сборник материалов Международной научно-практической конференции обучающихся, посвященной 90-летию со дня рождения Е.П. Огрызкова – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2019. – С. 311-315.
4. Гречников Ф.В., Захаров О.В., Королев А.А. Направления повышения производительности и точности контроля сложных поверхностей на координатно-измерительных машинах // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2016). Труды XVI-ой международной молодежной конференции. – М.: ООО «Аналитик», 2016. – С. 223-225.
5. Болтунова Е.С., Калашников А.А., Галайко В.В. Совершенствование специализированных автоматизированных средств измерений // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – Т. 2. – С. 978-980.
6. Патент №2724386 РФ. Мехатронный профилограф / С.А. Васильев, Р.И. Александров, А.А. Федорова, М.А. Васильев, С.А. Мишин, С.Е. Лимонов. – Заявка №2021113237 от 05.05.2021; опубл. 21.04.2022, Бюл. №12.
7. Патент №2770800 РФ. Полевой мехатронный профилограф / С.А. Васильев, Р.И. Александров, А.А. Федорова, М.А. Васильев, С.А. Мишин, С.Е. Лимонов, В.В. Алексеев, И.Н. Иванов. – Заявка №2020107081 от 14.02.2020; опубл. 23.06.2020, Бюл. №18.
8. Федорова А.А. Кинематический анализ мехатронного профилографа // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2022. – № 10. – С. 11-13. – doi.org/10.26160/2541-8637-2022-10-11-13.
9. Васильев С.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров профилографов для контроля мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2016. – № 4(24). – С. 40-54.
10. Афоничев Д.Н., Лощенко А.В., Пиляев С.Н. Моделирование микропрофиля пути с помощью программного комплекса SimInTech // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 27 марта 2020 года. Часть II. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2020. – С. 268-277.

## References

1. GOST 33736-2016. Machines for deep tillage. Test methods. – M.: Standartinform, 2020. – 35 p.
2. GOST 33687-2015. Machines for surface tillage. Test methods. – M.: Standartinform, 2016. – 41 p.
3. Studenikin A.V., Myalo V.V. Methodology for testing a vibration cultivator // The role of students' research work in the development of agriculture. Collection of materials of the International scientific and practical conference of students dedicated to the 90th anniversary of the birth of E.P. Ogryzkov. – Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 2019. – P. 311-315.
4. Grechnikov F.V., Zakharov O.V., Korolev A.A. Directions for increasing the productivity and accuracy of control of complex surfaces on coordinate measuring machines // Systems for design, technological preparation of production and management of stages of the life cycle of an industrial product (CAD/ CAM/PDM-2016). Proceedings of the XVI-th International Youth Conference. – M.: LLC "Analyst", 2016. – P. 223-225.
5. Boltunova E.S., Kalashnikov A.A., Galayko V.V. Improvement of specialized automated measuring instruments // Current problems of aviation and astronautics. 2022, vol. 2, pp. 978-980.
6. Patent No. 2724386 RU. Mechatronic profiler / S.A. Vasiliev, R.I. Aleksandrov, A.A. Fedorova, M.A. Vasiliev, S.A. Mishin, S.E. Limonov. – Appl. No. 2021113237 from 05.05.2021; publ. 21.04.2022 Bul. No. 12.
7. Patent No. 2770800 RU. Field mechatronic profiler / S.A. Vasiliev, R.I. Aleksandrov, A.A. Fedorova, M.A. Vasiliev, S.A. Mishin, S.E. Limonov, V.V. Alekseev, I.N. Ivanov. – Appl. No. 2020107081 from 14.02.2020; publ. 23.06.2020, Bul. No. 18.
8. Fedorova A.A. Kinematic analysis of a mechatronic profiler // Mechatronics, automation and robotics. 2022, no. 10, pp. 11-13. doi.org/ 10.26160/2541-8637-2022-10-11-13.
9. Vasiliev S.A. Substantiation of the structural and technological parameters of profilographs for the control of reclamation technologies on sloping agricultural landscapes // Scientific Journal of the Russian Research Institute of Problems of Reclamation. 2016, no. 4(24), pp. 40-54.
10. Afonichev D.N., Loshchenko A.V., Pilyaev S.N. Modeling of the microprofile of the path using the SimInTech software package // Current directions of scientific research for the effective development of agriculture: Materials of the international scientific and practical conference, Voronezh, March 27, 2020. Part II. – Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2020. – pp. 268-277.

### *Сведения об авторах:*

<b>Федорова Алена Анатольевна</b> – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения	<b>Fedorova Alena Anatolyevna</b> – senior lecturer at the Department of mechanical engineering technology
<b>Жижко Алексей Анатольевич</b> – студент	<b>Zhizhko Aleksey Anatolyevich</b> – student
<b>Иванов Кирилл Геннадьевич</b> – студент	<b>Ivanov Kirill Gennadievich</b> – student
e_a_a@mail.ru	

### *Information about authors:*

Получена 10.06.2024